

**PWR 핵연료 봉 커팅 및 펠렛 압출장치에 대한 연계 시스템 구축**  
**Interface System Construction for PWR Spent Fuel Rod Cutting and Pellet Pressing Device**

정재후, 윤지섭, 홍동희, 김영환, 진재현, 박기용(한국원자력연구소)  
 Jaehoo Jung, Jisup Yoon, Donghee Hong, Younghwan Kim, Jaehyun Jin, Gheeyong Park(KAERI)

**Abstract**

The authors have developed two devices which cuts the spent fuel rod to an optimal size and extracts fuel pellet from the pieces of cut fuel rods. These devices are so important to reduce radioactive wastes that some advanced countries developed their own methods and devices. The authors have benchmarked from these methods and devices. For spent fuel rod cutting, the tube cutting method has been chosen. some mechanical properties of the fuel tube and pellet has been carefully considered for an optimal cutting size. For fuel pellet extraction, a mechanically extracting method has been adopted. The existing chemical method have turned out to be inappropriate because it produced large amount of radioactive wastes, in spite of its high fuel recovery characteristics. The developed method has an advantage that it can be applied to other fuel rods that have different shapes and sizes. The two devices are set up and operated in the hot cell where people can not go in, so that the devices have been designed to be controlled remotely and modulated for easy maintenance. And the performance of the devices has been tested by using simulated fuel rod. From the experimental results, the devices are supposed to be useful for reducing radioactive wastes.

**Key words :** Spent Fuel Rod, Rod Cutting, Pellet Extraction, Automatic Interface, Hot Cell, Graphic Simulation

**1. 서 론**

사용후핵연료는 원자력을 이용한 전력 생산에 따라 필연적으로 발생하는 부산물로서, 이를 안전하고 효율적으로 관리할 수 있는 기술을 개발하기 위한 연구가 지속적으로 수행되고 있다. 특히, 핵연료 집합체 해체 기술은 핵연료를 재활용 또는 처분시키기 위한 전처리 기술로서, 액체 폐기물이 다량 발생하는 종래의 습식 방법에 의한 해체 기술을 지양하고, 폐기물 량의 감소 등 여러 측면에서 유리한 건식 방법을 이용한 해체 기술에 대한 관심이 집중되고 있는 추세이다. 핵연료 해체 공정은 핵연료 집합체로부터 각각의 핵연료봉을 인출, 인출된 핵연료봉을 적절한 길이로 절단, 절단된 핵연료봉으로부터 펠렛을 압출하는 공정 등으로 구성된다. 본 연구에서는 이와 관련된 기술자료 분석 결과를 토대로 건식 방법에 의한 핵연료봉 절단 및 펠렛 압출 장치를 개발하고, 공정을 최적화 하여 성능 실험을 수행하였으며, 각 단위 공정간 연계 시스템을 구축하여 자동화하였다. 이들 공정 장치는 고방사선 구역에서 작업을 수행하게 되므로 원격 운전 및 유지·보수, 각 장치의 작업 효율성 및 안전성을 고려하였다. 또한, 3차원 그래픽 시뮬레이션 툴인 Delmia 사의 IGRIP을 이용한 가상 작업 환경을 구축하여 설계한 장치의 성능 검증과 공정의 최적화를 수행하였다.

**2. 사용후핵연료봉 절단 장치**

**2.1 사용후핵연료봉 절단장치 개요**

사용후핵연료봉 절단은 펠렛 압출 공정의 전 단계로서 핵연료 집합체로부터 인출된 핵연료 봉을 압출 방식에 의한 펠렛 압출이 용이하도록 적절한 길이로 절단하는 장치이다. 절단 장치는 핵연료봉 절단시 화재 위험성이 없고, debris 발생량이 적고, 절단부의 원형도 유지 상태가 양호한 tube cutter에 의한 절단 방식을 채택하여 본 장치를 설계·제작하는데 적용하였다.

**2.1 사용후핵연료봉 절단장치 설계·제작**

사용후핵연료봉 절단 장치는 이송, 파지, 절단 및 배출부 등으로 구성되며, 크기는 길이 2,935 mm, 높이 1,163 mm, 폭 420 mm 이고, 이들 주요부의 내용은 다음과 같다. 이송부는 연료봉 인출 장치로부터 인수한 연료봉을 이송 로울러를 이용하여 절단부로 이송시키는 기능을 수행하며, 로울러는 위에 안치된 연료봉의 이탈을 방지할 수 있는 구조로 되어있다. 파지부는 이송된 연료봉을 절단하는 동안에는 연료봉을 고정하고 절단이 완료된 후에는 다음 절단을 위하여 설정된 길이 만큼 연료봉을 절단부로 삼입시키는 기능을 수행하며, 고정시 무리한 힘에 의하여 연료봉이 손상되지 않는 구조로 설계하였다. 절단부는 tube cutter 메카니즘을 적용하여 진입되어온 핵연료봉을 절단하는 부분으로, 절단하고자 하는 길이 (30 mm) 만큼의 연료봉 진입 여부, 절단 과정 및

절단 완료 여부는 센서를 이용한 감시 시스템을 통하여 원격으로 확인이 가능하도록 구성하였다. 또한, 절단시 발생되는 분진을 포집하는 시스템을 장착하여, 오염확산을 방지할 수 있도록 하였다. 배출부는 폐기물로 수집되는 핵연료봉의 상하 봉단 마개와 펠렛 압출 시스템으로 이송되는 펠렛 장입 부분을 분류하여 배출할 수 있도록 하였다. 이들 주요부는 원격 제어에 의한 운전이 용이한 부품의 배치와, 원격 유지·보수가 가능하도록 부품을 모듈화하여 설계·제작하였다. 절단 장치의 주요 구동부 모듈은 kick, roller, feeder, cutter, distributor이며, 각 모듈 별로 분류되어 3차원 그래픽으로 모델링된 구동 부품들 부분 조립하고 구동 특성을 부여하여, 장치의 동작 및 간섭 현상을 검증하였다. 또한, 실제 작업 환경과 동일한 그래픽 가상 환경을 구축하여 공정 시나리오에 따라 시뮬레이션을 수행하고, 공정 분석을 통하여 최적의 핵연료 봉 절단 공정을 수립하였다. Fig. 1은 3차원 그래픽으로 구축된 가상 작업 환경에서 핵연료봉 절단 공정 흐름에 따라 수행한 공정 시뮬레이션을 나타낸 것이며, Fig. 2는 성능 실험을 위하여 제작된 장치의 모습을 나타내고 있다.

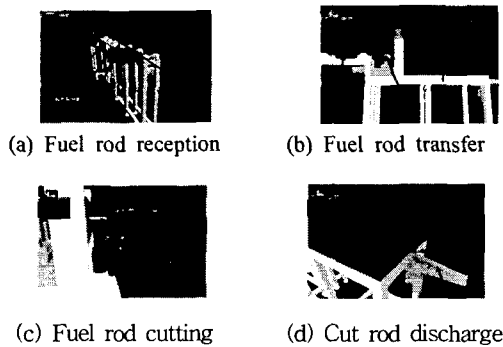


Fig. 1 Simulation of fuel rod cutting process.



Fig. 2 Fuel rod cutting device.

사용후핵연료봉을 절단하기 위해 고려해야 할 주요한 인자는 핵연료봉을 절단하는 cutter blade의 특성이다. Cutter blade의 재질은 고속도강으로 가공 및 열처리하여 사용하였다. 절단 장치의 절단 효율성을 높이고 내구성이 좋은 cutter blade의 조건을

도출하기 위하여 blade의 크기와 각도 등을 고려하여 A형 blade(20.3°), B형 blade(28.6°), C형 blade(53.1°)의 3 종류로 cutter blade를 제작하여 실험을 수행하였다.

### 2.1 평가 실험

사용후핵연료봉 절단 장치의 최적 운전 조건을 설정하기 위하여, cutter blade의 회전 속도, 이송속도 및 형태에 따른 절단 효율을 근거로 성능 평가를 수행하였다. 제작된 3 종류의 cutter blade별로 회전 속도 조건을 1,000, 1,200, 1,400 rpm으로 하고, cutter blade의 절단 길이 방향으로 이송 속도를 각각 27.7, 22.7, 16.6 rpm 등으로 가변 하면서 실험을 수행하였으며, 실험 결과는 Fig. 3에 나타낸 바와 같다. 절단 시간 평가 결과 값은 각 조건별로 10회씩 실험을 수행한 결과를 평균한 값이며, 절단에 소요되는 시간은 cutter blade의 회전 속도가 저속이고, cutter blade의 이송속도(rpm)가 빠를 수록 짧아진다. 또한, C형 cutter blade(날 각도 53.1°)를 사용하는 경우가 절단 시간이 가장 짧은 것으로 나타났다. 따라서, 이 장치의 최적 운전을 위한 cutter blade는 C형을 사용하여야 하며, 이 때의 운전 조건으로서는 회전 속도를 1,000 rpm, cutter blade의 이송 속도가 27.7 rpm일 때가 가장 적합한 것으로 판명되었다.

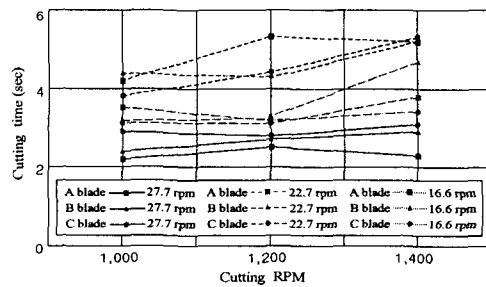


Fig. 3 Cutting time according to rpm of blade type.

## 3. 사용후핵연료 펠렛 압출 장치

### 3.1 사용후핵연료 펠렛 압출장치 개요

사용후핵연료 펠렛 압출 장치는 핵연료를 재활용하기 위한 기본 공정인 핵연료봉 내부의 펠렛을 압출하기 위한 공정 장치이다. 본 연구에서는 화학적 방법 및 기계식 방법에 대한 분석 결과를 토대로 하여, 공정에 따른 2차 폐기물 발생량이 적고, 국내 실정에 적합한 건식 방법인 압출 핀을 이용한 기계식 펠렛 압출 방법을 고안하여 장치를 개발하였다.

### 3.2 사용후핵연료 펠렛 압출장치 설계 및 제작

사용후핵연료 펠렛 압출 장치는 압출 핀으로 핵연료봉 내의 펠렛을 압착하여 인출할 수 있는 구조로 하

였으며, 펠렛 회수율을 높이고, 압출시 발생될 수 있는 비산 먼지의 확산을 방지 할 수 있도록 설계하였다. 이 장치의 구성은 몸체, 절단 핵연료봉 투입구, 압출 핀 구동 모터, 압출 핀, 힘 측정 센서(로드 셀), 지그 회전 장치, 펠렛 고정 지그, 펠렛 회수부, 피복관 회수부 등으로 되어 있다. 장치의 크기는 길이 738, 폭 554, 높이 1,050 mm 이다. 펠렛 압출 시스템 개념 검증을 위한 장치의 3차원 그래픽 모델은 기능별로 frame/insert, jig 및 pin으로 구성되며, 이들 주요부의 상세한 내용은 다음과 같다. Frame/insert 부는 펠렛 압출시 많은 중량을 받을 수 있도록 제작하였으며, 방사선 구역 내에 장치를 투입 할 경우를 고려하여 크기를 최소화하였다. 핵연료봉을 장입에서부터 펠렛 및 피복관 배출시까지의 공정을 자동화하였다. 펠렛 압출 핀은 펠렛 압출시 핀에 많은 힘이 전달됨으로 사용시 구부러지거나 파손되는 것을 방지하기 위하여 열처리하였으며, 또한 압출 핀이 구부러지는 것을 방지하기 위하여 핀 가이드 부착, 펠렛을 압출 한 후 압출 핀에 펠렛이 묻지 않도록 브러쉬를 부착하였고, 핀이 구부러지거나 파손되었을 때 쉽게 교환이 가능한 메카니즘으로 하였다. 사용후핵연료 펠렛 압출 장치의 기능별 부품을 3차원으로 모델링하여 조립한 부분 assembly에 kinematics, DOF(Degree Of Freedom)를 설정하여 구동 특성을 부여하고, 장치 동작을 검증하였다. 펠렛 압출 시스템은 3D 그래픽 모델링을 이용하여 압출 공정 흐름에 따라 그래픽 가상 작업 환경에서 시뮬레이션 하였으며, 이는 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 핵연료봉 절단 장치에서 배출된 절단 핵연료봉은 이송 통로를 통하여 펠렛 압출 장치로 이송되며, 지그 회전판에 장착되어 압출 위치로 회전한다. 이때, 압출 핀이 부착된 플레이트가 하강하여 압출함으로써 핵연료봉 내의 펠렛이 인출되어 펠렛 상자에 수집되며, 압출이 완료된 피복관도 별도로 수집된다. 원격 조작에 의하여 수행되는 펠렛 압출 장치의 최적 운전 조건을 도출하기 위하여 제작한 성능 실험용 장치는 Fig. 5에서 보는 바와 같다.

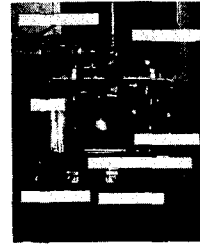
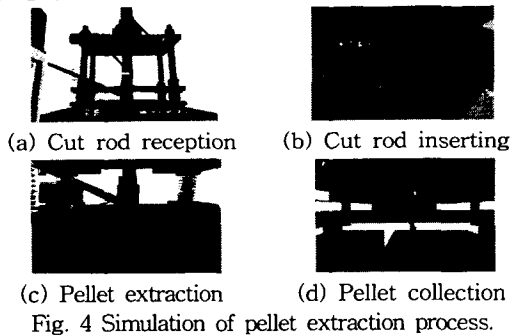


Fig. 5 Pellet extraction device.

### 3.3 성능 실험 및 평가

사용후핵연료 펠렛 압출 장치 운전을 위한 주요 인자는 펠렛 회수율, 힘 및 회수 시간 등으로 이들을 측정하기 위하여 펠렛 압출 장치의 성능 실험을 수행하였다. 본 실험에서는 길이 30 mm로 절단된 도의 핵연료봉 시편을 사용하였으며, 1회 실험 당 10개의 핵연료봉 시편을 인출하여 평균값을 구하였다. 사용후핵연료 펠렛 압출 장치의 성능 실험에 의한 회수율 및 압출 힘에 대한 결과는 Fig. 6에서 보는 바와 같다.

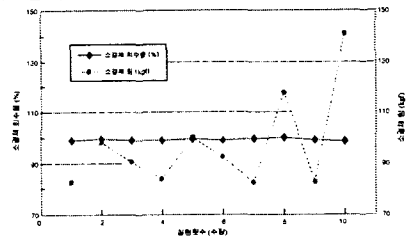


Fig. 6 Recovery rate & extraction force.

선진국에서 사용하는 기계식 방법의 펠렛 회수 장치의 회수율은 일반적으로 95~99 % 범위에 있으며, 본 연구에서 개발한 장치의 회수율은 Fig. 7에서 바와 같이 평균 98.97 %로 나타났다. 또한 무리한 압출 힘으로 인한 장치의 수명 단축을 방지하고 부품의 고장을 최소화하기 위하여, 장치 성능에 영향을 미치는 압출 힘은 100 kgf를 초과하지 않도록 설계·제작하였다. 실험 결과 평균 압출 힘은 96.3 kgf로 나타났다. 이와 같이 본 연구에서 개발한 펠렛 압출 장치는 기존의 기계식 방법인 연료봉을 길이 방향으로 slitting하여 펠렛을 압출 방식에 비하여 공정이 단순하고 펠렛 회수율도 비교적 우수한 것으로 판단되었다.

## 4. 핵연료봉 절단 및 펠렛 압출 장치의 연계 공정

### 4.1 장치의 연계공정 개요

방사선 환경인 핫셀에 설치된 단위 장치의 연속

공정을 수행하기 위해서는 인접 장치간의 연계 시스템이 필요하다. 본 연구에서는 연료봉 인출 장치로부터 인출된 4 m의 핵연료봉을 절단 장치에서 인수하기 위한 연계 시스템과 절단 핵연료봉을 펠릿 압출 장치로 이송시키기 위한 연계 시스템을 구축하였다. 이들 연계 공정의 자동화는 장치에 설치된 센서와 단위 장치 제어 시스템간의 정보 교환을 통하여 구현하였다.

#### 4.2 사용후핵연료 봉 인수 시스템

사용후핵연료봉 절단 공정 수행을 위하여 인접 장치인 핵연료봉 인출 장치에서 핵연료봉을 인수하는 연계장치인 kicking system은 Fig. 7에서와 같다. 이 장치는 인출된 핵연료봉을 인지한 후 제어 시스템과의 신호 교환을 통해 자동으로 핵연료봉 인수 공정을 수행하며, Fig. 8은 연계 공정을 그래픽 시뮬레이션으로 나타낸 것이다.



Fig. 7 Kicking system.



Fig. 8 Simulation of kicking process.

#### 4.3 절단 사용후핵연료 봉 이송 시스템

사용후핵연료봉 절단 장치에서 절단된 핵연료봉을 펠릿 압출 장치로 이송하기 위한 연계 장치인 chute system은 Fig. 9과 같다. 이 연계공정의 그래픽 시뮬레이션은 Fig. 10과 같다.

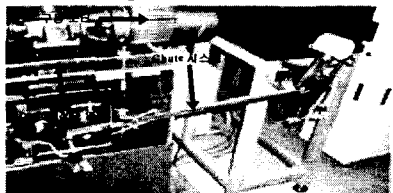


Fig. 9 Chute system.



Fig. 10 Simulation of kicking process.

#### 4. 결론

본 연구에서는 사용후핵연료 건식 재활용 공정의 전처리 공정인 핵연료봉 절단 공정과 펠릿 압출 공정을 개발하고, 이에 대한 성능 실험을 수행하였다. 핵연료봉 절단 공정 장치는 여러 가지 방식에 대한 자료 분석 및 기초 실험 결과, 절단시 불꽃과 분진 발생량, 절단면의 원형도 유지 정도가 가장 우수한 것으로 분석된 tube cutter 방식을 채택하여 실증용 핵연료봉 절단 장치를 설계·제작하였다. 제작된 장치를 이용하여 절단부의 압착 정도, 절단 공정의 효율성 및 신속성 등에 대한 성능 실험을 수행하였다. 실험 결과, C 형의 cutter blade를 사용하여 절단 회전 모터의 회전수가 저속(1,000 rpm)이고, 이송 속도를 크게(27.7 rpm)할 경우 절단 효율이 높고 우수한 것으로 판명되었다. 핵연료 기계식 펠릿 압출 장치는 2차 폐기물 발생이 적은 압출 방식을 선정하고, 핵연료봉 절단 공정과의 연계성을 고려하여 원격 조작 방식으로 구동되는 장치를 설계·제작하였다. 이 장치의 펠릿 회수율 및 압출에 소요되는 최적 운전 조건 도출을 위한 성능 실험을 수행하였다. 실험 결과, 펠릿 회수율은 98.97 %로 선진국에서 개발한 장치와 대등한 성능을 보였다. 또한, 단위 공정 장치간 연속 공정이 가능하도록 자동화된 연계 시스템을 구축하였으며, 원격 운전 및 유지·보수가 용이하도록 시스템을 구성하였다. 결론적으로, 본 연구에서 개발한 핵연료봉 절단 시스템, 펠릿 압출 시스템 및 연계 시스템에 대한 장치 및 성능 실험 결과는 향후 국내 경수로형 핵연료의 건식 방법에 의한 재활용 공정 수립에 유용하게 활용될 수 있다.

#### 참고 문헌

1. Matcheret and M. Bourgeois, 1973, "Mechanical Decladding of Stainless-steel-clad Oxide Fuels", CEA-R-4469.
2. 양명승 외, 1986, "핵연료제조 및 품질관리 기술개발," KAERI/RR-1744/96, 한국원자력연구소, 과학기술처.
3. K. Fukudome, 1997, "Mechanical Decladding by Rolling Straightener", Technical Report, Kobe Steel Ltd., July.
4. 김성현 외, 2000, "사용후핵연료 수직/수평 회전기구 및 핵연료봉 절단장치 개발", KAERI/TR-1604/00, 한국원자력연구소.
5. Fuel Rod Consolidation Project Final Design Report Contract No. DE-ACO7-86ID 12651. DOE/ID/12651-2-Vol. 1 DE88 004219.
6. 박장진 외, 1999, "경·중수로 연계핵연료주기 기술개발," KAERI/RR-2009/99, 한국원자력연구소, 과학기술처.